

連続鋳造における鋳型/鋳片間のモールドパウダーの挙動に関する研究

著者	堤 康一
号	1953
発行年	2000
URL	http://hdl.handle.net/10097/10760

つつみ こういち

氏 名 堤 康一

授 与 学 位 博士 (工学)

学 位 授 与 年 月 日 平成12年12月13日

学位授与の法規根拠 学位規則第4条第2項

最 終 学 歴 平成4年3月

東京工業大学大学院総合理工学研究科エネルギー科学専攻修士
課程修了

学 位 論 文 題 目 連続 casting における 鋳型 / 鋳片間の モールド パウダー の 挙動 に関する 研究

論 文 審 査 委 員 主査 東北大学 教授 日野 光元 東北大学 教授 溝口 庄三
東北大学 教授 谷口 尚司

論 文 内 容 要 旨

第1章 緒言

本論文は、鉄鋼業の連続 casting プロセスにおける低コスト・高生産性を目的とした casting 速度の高速化技術のための基礎研究を論じたものである。その高速 casting を安定に実現し、かつ品質の優れた連 casting 鋳片を製造するためには、鋳型 / 鋳片間の流れ込むモールドパウダー (以下、パウダーと略記) の挙動を把握し、制御することは非常に重要である。一般に高速 casting を実施すると、鋳型 / 鋳片間に流れ込むパウダーの量が減少し、摩擦が増しブレイクアウトと呼ばれる操業トラブルが発生する。また、炭素含有量が0.08-0.20mass%の範囲にある中炭素鋼に代表されるような不均一凝固しやすい鋼種は、鋳型 / 鋳片間の抜熱量が増すと、鋳片の表面に縦割れが発生する品質上のトラブルが発生する。そこで、本論文は高品質の鋳片を高生産性で casting するための基礎技術の開発について以下論じた。

第2章 Sn-Pb合金を用いた連続 casting シミュレーターによる鋳型 / 鋳片間のパウダーの潤滑挙動

本章においては、高速 casting を安定的に実現するための鋳型 / 鋳片間の潤滑メカニズムを明らかにすることを目的として、実験室規模の装置を用いて、低融点合金と疑似モールドパウダーを用いたシミュレーション実験を行った。実験ではメネスカス近傍のパウダーの流れを直接観察するために、メネスカス部に石英製の観察ガラスを設置し、 casting 実験を行った。また、潤滑挙動を定量的に把握するために、鋳型に設置したロードセルの荷重変化から鋳型 / 鋳片間の摩擦力を算出した。その結果、Fig.1に示すようにパウダーの流入は、 t_p 期に支配的に流入していること、また、振動数の減少、 casting 速度の減少、振幅の増加、歪み率の増加によって、鋳型 / 鋳片間の摩擦力が減少する結果が得られた。これらの結果は、実操業において経験的に得られていた知見と一致した。本結果は、実操業の鋳型 / 鋳片間のパウダーの潤滑挙動を代表するものとして、さらなる高速 casting 実現のための潤滑挙動の一指標として大いに活用されている。

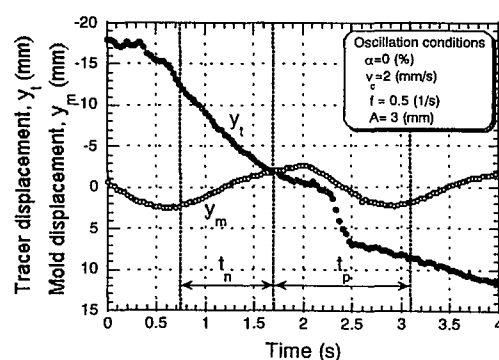


Fig.1 Inflow behavior of Al_2O_3 tracer around meniscus near the mold.

第3章 連続鋳造におけるパウダー消費量の評価

本章では、前章で得られた潤滑メカニズムが製鉄所の連続鋳造プロセスで使用されているパウダーと溶鋼を用いた鋳造時にも適用可能であるかどうかを確認するために、実験室規模の実験装置を用いてパウダー消費量を測定し、潤滑挙動の評価を行った。その結果、オシレーション条件が及ぼすパウダー消費量への影響に関しては、第2章と同じく t_p 時間の増加に伴い、1サイクルあたりのパウダー消費量が増加し、潤滑が向上するとの結果が得られた。つまり、第2章で得られた知見は、実機の現象をシミュレートできていたことがわかった。また、パウダー物性がパウダー消費量に及ぼす影響も同時に検討するために、粘度と、これまで着目されていなかった結晶化温度の二つの物性値について着目し、8種類のパウダーを用いてパウダー消費量を測定した。その結果、パウダー消費量は、粘度の-0.5乗、結晶化温度の-1.6乗に比例するとの結果を得た。

そこで、これまでの知見をまとめ、パウダー消費量の実験式を作成し、製鉄所の実プロセスで試験を行った。その結果、Fig.2に示すように実験式から予測されたパウダー消費量は、製鉄所の連鋳機で測定されたパウダー消費量の値と良い一致を示すことがわかった。本研究によって得られたパウダー消費量の実験式によって、予めパウダー消費量が推定でき、パウダーを変更した際などに生じる危険性のある鋳型／鋳片間の潤滑不足によるブレイクアウトなどの操作トラブルを回避できるようになり、製鉄所の現場で大いに活用されている。

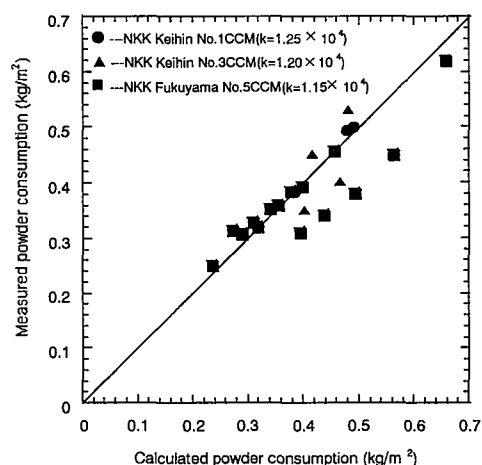


Fig.2 Comparison of calculated powder consumption with the measured.

第4章 鋳型／鋳片間の伝熱に及ぼすパウダーの結晶化と臨海冷却速度

本章においては、高速鋳造における安定鋳造技術の次に問題となる鋳型／鋳片間の伝熱挙動に関する基礎研究を行った。これまで中炭素鋼において発生していた鋳片表面に発生する縦割れを防止する手段として、鋳型／鋳片間に流れ込むパウダーを結晶化させ、鋳型／鋳片間の伝熱を緩冷却させる方法が経験的に有効であるとされているが、結晶化に及ぼすパウダーに含まれる添加元素の影響については、これまでの実操業の結果から経験的に得られたものに過ぎなかった。そこで、本章においては、パウダー中に含まれているアルカリ金属酸化物のパウダーの結晶化に及ぼす影響を把握するために、実際の鋳型／鋳片間の冷却速度と同等の冷却速度における測定が可能な hot-thermocouple法を用いて実験を行い、結晶化温度および結晶化のパラメータである臨界冷却速度を測定した。パウダーは SiO_2 と CaO を主成分

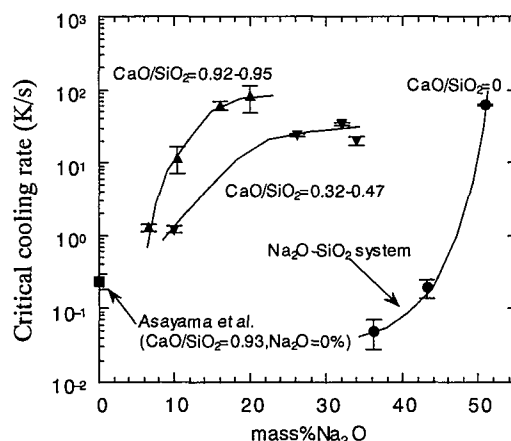


Fig.3 Variation of critical cooling rate with mass%Na₂O at constant CaO/SiO₂ mass ratio in Na₂O-CaO-SiO₂ system.

とした多元系スラグであることから、スラグの系を単純化して、 SiO_2 に Na_2O 、 Li_2O を添加した二元系珪酸塩、および、 SiO_2 - CaO に Na_2O 、 Li_2O を添加した三元系珪酸塩を用いて実験を行った。その結果、Fig.3に示すように、二元系珪酸塩および三元系珪酸塩ともに、アルカリ金属酸化物の添加量の増加に伴い、臨界冷却速度が大きくなり、アルカリ金属酸化物は結晶化を促進するのに有効な添加物であることがわかった。また、アルカリ金属酸化物である Na_2O と Li_2O 間で比較すると、二元系珪酸塩の場合は、 Li_2O の方が結晶化促進には大いに有効な添加物であることがわかった。また $\text{CaO}/\text{SiO}_2=1$ (mol ratio)の三元系珪酸塩の場合には、同じmol%濃度の Na_2O と Li_2O の添加で、同等の臨界冷却速度を得ることがわかった。また CaO/SiO_2 が大きくなると、二元系珪酸塩場合

と同様に Li_2O の方が結晶化促進に有効な添加物であることがわかった。本研究により、これまで知られていなかった実際の鑄型／鑄片間の冷却速度におけるパウダーの結晶析出挙動が明らかになり、また、アルカリ金属酸化物の添加量の結晶化に及ぼす影響が明らかになった。本研究結果は、実際にパウダーを製造する上で結晶化促進のための添加元素の役割について大きな指標を与え、またパウダーの製造方法の指針を示した。

第5章 パウダーの結晶化と鑄型／鑄片間の緩冷却機構とその評価

これまで鑄型／鑄片間の緩冷却のメカニズムについて、様々なメカニズムが提唱されてきたが、本章では、鑄型／鑄片間に流れ込んだパウダーが凝固した表面に表れる凹凸が界面熱抵抗を増大させていると推定し実験を行った。実験では、イメージ加熱炉を備えた共焦点走査型レーザー顕微鏡を用いてパウダーの加熱および冷却過程を直接観察すると同時に、結晶が析出した時のパウダーの表面粗度を測定した。その結果、Fig.4に示すように冷却速度の増加に伴い、表面粗度は平滑になること、また結晶化温度の高い中炭素鋼用パウダーの表面粗度の方が、低炭素鋼用パウダーのそれより粗くなることがわかった。また、第4章で求めたそれぞれのパウダーの臨界冷却速度で冷却速度を除いて得られる規格化した冷却速度を用いることにより、すべてのパウダーの表面粗度を一様に評価できることを見出した。本研究結果は、鑄型／鑄片間の伝熱挙動のメカニズムを明らかにしたとともに、イメージ加熱炉を備えたレーザー顕微鏡を用いて凝固後のパウダーの表面粗度を測定するという新しい評価手法により、試作したパウダーの緩冷却の度合いを予め把握することができ、実操業のパウダーの開発に大いに利用されている。

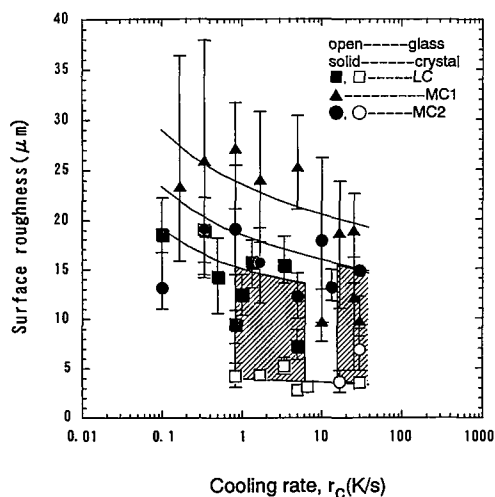


Fig.4 Relation between cooling rate, r_c , and surface roughness of solidified mold powder for low and middle carbon steel casting.

第6章 実機への適用試験の結果と工業化への応用

本章においては、前章までの実験室規模の実験により得られた様々な知見が、製鉄所の連鑄機に実際に適用が可能であるかどうかの試験を行った結果について論じた。試験においては、前章までに使用した低炭素鋼用および中炭素鋼用のパウダーを1種類ずつ用いて、実プロセスの高速連鑄機の代表であるNKK福山第5連鑄機を用いて鑄造試験を行った。その結果、鑄型／鑄片間の潤滑および伝熱特性に関して、実験室規模の実験より得られた知見通りに、実機の試験結果を説明できたこと、特に、高速鑄造において、安定鑄造が実現し、かつ鑄片表面の縦割れの個数が激減した。これにより、本研究により得られた知見は、製鉄所の連鑄機において十分適用可能であり、工業化への応用ができることを明らかにした。

第7章 総括

本章においては、前章までの得られた知見をまとめ総括を述べるとともに、今後の連続鑄造技術の開発に関する展望および課題について論じた。本研究から得られた知見により、連鑄機の高生産性を実現するために連鑄機の鑄造速度を高速化しても操業トラブルがなく安定鑄造することができ、かつ、抜熱量が大きく鑄片の表面に縦割れが生じやすい高速鑄造においても、界面熱抵抗の大きなパウダーを使用することによって、表面欠陥のない鑄片を安定して鑄造することができる技術を開発できた。従って、本論文で得られた結果は、高速連鑄操業の工業化に大いに寄与することができた。

審査結果の要旨

鋼の高速鋳造を安定に実現し、かつ品質の優れた連鋳鋳片を製造するためには、鋳型／鋳片間に流れ込むモールドパウダーの挙動を把握することは非常に重要である。一般に高速鋳造を実施すると、鋳型／鋳片間に流れ込むモールドパウダーの量が減少し、摩擦が増しブレイクアウトと呼ばれる操作トラブルが発生する。また、中炭素鋼に代表されるような不均一凝固しやすい鋼種は、鋳片の表面に縦割れが発生する品質上のトラブルが発生する。本論文は、鉄鋼業の連続鋳造プロセスにおいて、これらのトラブルを生じさせずに、低コスト・高生産性を実現することを目的とした、鋳造速度高速化技術開発のための基礎研究を纏めたもので、全文7章よりなる。

第1章は緒言である。第2章では、先ず、高速鋳造を安定的に実現するために、鋳型／鋳片間の潤滑メカニズムを明らかにすることを目的として、低融点合金と疑似モールドパウダーを用いたシミュレーション実験を行った結果について述べている。実験に際しては、鋳型／鋳片間の摩擦力の測定、および、鋳型／鋳片間に流れ込むモールドパウダーの挙動を直接観察し、潤滑メカニズムの解明を行い、興味深い知見を得ている。

第3章では、そのシミュレーション実験の結果に基づき、溶鋼と、物性の異なる数種類のモールドパウダーを用いた鋳造実験を行い、潤滑に及ぼすモールドパウダーの物性の影響、および鋳型振動条件の影響を明らかにしている。これにより、連続鋳造プロセスにおいて、安定して高速鋳造操作することが可能となった、基礎技術を開発した経緯について述べている。

第4章では、高速鋳造が実現された場合に問題となる連鋳鋳片の表面縦割れを防止するために、モールドパウダーを介した鋳型／鋳片間の伝熱挙動のメカニズムを検討した結果を述べている。これまで結晶化し易いモールドパウダーは、鋳型／鋳片間の伝熱を緩冷却にして表面縦割れを防止することが可能であることが知られていたが、その伝熱メカニズムは不明であった。そこで、先ず、モールドパウダーの大部分を占める、 SiO_2 および $\text{SiO}_2 \cdot \text{CaO}$ に対するアルカリ金属酸化物混合比と、結晶化の指標である臨界冷却速度の関係について実験を行った。これよりモールドパウダー中に含まれるアルカリ金属酸化物含有量のガラス／結晶転移への影響を定量的に明らかにした。

第5章では、鋳型／鋳片間の伝熱挙動を支配しているものとして、鋳型と凝固したモールドパウダーとの界面熱抵抗の存在について着目し、その界面熱抵抗を支配していると推測される、凝固後のモールドパウダーの表面粗度を、レーザー顕微鏡を用いて測定し、結晶化し易さの指標である臨界冷却速度との関係を検討し、連鋳高速化に当たっての非常に有益な情報を提供している。

第6章では、本研究により得られた知見を基に、実操業の連鋳機を用いて種々試験を行い、本研究で得られた基礎知見が工業化へ応用できることを明らかにした。

第7章は総括である。

以上要するに本論文は、鋳造速度を高速化してもトラブルがなく安定操作することができ、かつ、抜熱量が大きく鋳片の表面に縦割れが生じやすい高速鋳造においても、界面熱抵抗の大きなモールドパウダーを使用することによって、表面欠陥のない鋳片を安定して製造することができる技術を開発したもので、高速連鋳の工業化に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。